

WINDKANALSTUDIE ZUR STRÖMUNG IN WALDLICHTUNGEN

WIND TUNNEL STUDY OF THE FLOW IN CLEARINGS

C. Frank & B. Ruck

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 76228 Karlsruhe

Schlagworte: Wald, Lichtung, Windkanal

Key Words: Forest, clearing, wind tunnel

Zusammenfassung

Die Umströmung von Waldbeständen mit quer zur Anströmrichtung verlaufenden Lichtungen wurde experimentell in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal untersucht. Die Breite der Lichtung wurde zweifach variiert: $a = 1 \cdot H$ und $5 \cdot H$, mit $H =$ Bestandshöhe. Mittlere und turbulente Strömungsgrößen wurden mit Hilfe eines 2D-LDA-Systems innerhalb der Lichtung sowie über den daran angrenzenden Waldbeständen erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Variation der Lichtungsbreite die Strömungsvorgänge insbesondere im Lichtungsbereich und über dem im Lee der Lichtung angeordneten (zweiten) Wald beeinflusst werden, wohingegen über dem stromauf gelegenen Wald keine signifikante Änderung der Strömungsgrößen zu beobachten ist. Die variierte Lichtungsbreite wirkt sich in unmittelbarer Kronendachnähe des zweiten Waldes bis zu einer Entfernung von $4H$ aus.

1. Einleitung

Natürliche Waldbestände weisen nur selten einen einheitlich homogenen Aufbau auf. Oftmals werden Waldbestände von Straßen und Waldwegen durchkreuzt, darüber hinaus sind häufig Lichtungen und kahl geschlagene Flächen unterschiedlichster Geometrie anzutreffen. Letztere können von Holzeinschlag, von Waldbränden oder auch von Sturmkatastrophen herrühren. Lichtungen im Allgemeinen stellen immer Unterbrechungen im Bestandsaufbau dar, welche Störungen des mittleren und turbulenten Windfelds bewirken und somit die Stabilität des Bestands beeinflussen können.

BERGEN 1975, 1976 untersuchte die Strömung in einer $1H \times 5H$ großen Lichtung im Feld. Seine Rauchversuche zeigen, dass die Wirbel in einer Waldlichtung intermittierend und instationär sind, siehe auch RAUPACH et al 1987.

RAUPACH et al 1987 untersuchten die Strömung in drei unterschiedlich breiten Lichtungen ($L/H = 4.3, 11.8$ und 21.3) im Windkanal ($H = 0.047$ m, $z_0 = 0.15$ mm), wobei die Ergebnisse der beiden kleinen Lichtungen leider nicht dargestellt wurden. Daten der $21.3 \cdot H$ breiten Lichtung wurden bereits mehrfach zum Test von numerischen Modellen herangezogen und zwar von WILSON und FLESCH 1999 (k-l-Modell), FOU DHIL et al 2005 (k- ϵ -Modell) und SOGACHEV und PANFEROV 2006 (k- ω -Modell). Die Ergebnisse von RAUPACH et al 1987 zeigen, dass die beiden mit der Lichtung einhergehenden Oberflächenwechsel rau – glatt und glatt – rau stromaufwärts keine bedeutsamen Auswirkungen haben. Die Turbulenz erreicht nach dem rau – glatt Übergang nur sehr langsam einen neuen Gleichgewichtszustand,

9.2

nach dem glatt – rau Übergang jedoch relativ schnell (bereits in einem Abstand zum Bestandsrand von etwa $10 \cdot H$). Unmittelbar stromab einer Lichtung gibt es eine Zone verstärkter Böen („enhanced gust zone“, $3 \leq x/H \leq 7$ und $0,6 \leq z/H \leq 1,0$), in der sich zwar die mittleren Geschwindigkeiten und die Turbulenzstärken nur wenig von ihren Werten im Gleichgewichtszustand unterscheiden, die Spitzenböen jedoch wesentlich stärker sind (d.h. die Skewness - Werte S_{ku} sind wesentlich höher). Für die schmälere Lichtungen wurden wohl ähnliche Strömungsmuster beobachtet; im Fall $a/H = 4.3$ sind die Auswirkungen wohl etwas „gedämpft“.

STACEY et al 1994 untersuchten experimentell zweidimensionale, quer zur Anströmrichtung verlaufende Lichtungen unterschiedlicher Breite ($a \leq 6,7 \cdot H$). Sie setzten dabei ein aeroelastisches Modell eines 15 m hohen Sitka-Fichten-Bestands (Maßstab 1:75) ein. Messungen von mittleren und extremen Biegemomente an ausgewählten Einzelbäumen zeigten: Bäume, die luvseitig an eine Lichtung angrenzen, erfahren die gleichen extremen Biegemomente wie Bäume innerhalb eines ausgedehnten Waldbestands. Auf der exponierten Seite im Lee einer Lichtung sind die extremen Biegemomente hoch, ihre Werte fallen jedoch innerhalb weniger Baumreihen rapide wieder ab. Diese schnelle Entwicklung einer Schutzwirkung wurde auch an einer vom Wind angeströmten Waldkante im Lee einer ausgedehnten offenen Fläche beobachtet. Bereits sehr kleine Lücken im Waldbestand führen dazu, dass sich die extremen Biegemomente, welche auf in der ersten Reihe stromab einer Lichtung stehenden Bäume einwirken, merklich erhöhen. Eine Lücke mit $a = 1H$ bewirkt beispielsweise schon annähernd eine Verdopplung der Biegemomente (verglichen zu den Werten im lückenlosen Bestand) und somit eine signifikante Erhöhung des Windschadensrisikos. Die extremen Biegemomente, welche Bäume in der zweiten bis zehnten Reihe stromab einer Waldkante erfahren, sind kleiner als die, welche auf Bäume inmitten eines ausgedehnten Waldbestands wirken. Dies wird von den Autoren dadurch erklärt, dass die im kantennahen Bereich innerhalb des Waldbestandes abgebremste Strömung teilweise nach oben umgelenkt wird und in Folge dessen Böen hier wahrscheinlich weniger stark von oben in den Bestand eindringen können.

Um das Wissen über die Strömungsvorgänge in Lichtungen zu erweitern, werden momentan experimentelle Untersuchungen in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal durchgeführt. Erste Ergebnisse zur Umströmung von Waldbeständen, die von zweidimensionalen Lichtungen unterschiedlicher Breite durchzogen sind, werden präsentiert.

2. Experimentelle Methoden

Die experimentellen Untersuchungen werden im geschlossenen, 29 m langen atmosphärischen Grenzschichtwindkanal des Laboratoriums für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe durchgeführt.

Ungestörte Anströmung

Durch den kombinierten Einbau von Wirbelgeneratoren und Rauheitselementen konnte eine neutral geschichtete atmosphärische Grenzschicht im Modellmaßstab 1:200 naturähnlich nachgebildet werden. Die gemessenen horizontalen Geschwindigkeiten können mit dem Potenzgesetz $u(z)/u_{ref} = (z/z_{ref})^\alpha$ und $\alpha = 0.26$ sehr gut beschrieben werden, siehe Abb. 1a. Aus dem logarithmischen Wandgesetz ergibt sich die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* zu 0.54 m/s und die Rauigkeitshöhe z_0 zu 1.9 mm (= 0.38 cm in der Natur). Die Turbulenzintensitäten in Hauptströmungsrichtung T_U (Abb. 1b) und in vertikaler Richtung T_W (Abb. 1c) nehmen mit zunehmender Höhe allmählich ab und stimmen hinreichend mit den theoretischen Profilen überein. Die simulierte Grenzschicht ist charakteristisch für vorstädtisches Terrain bzw. für Waldgebiete.

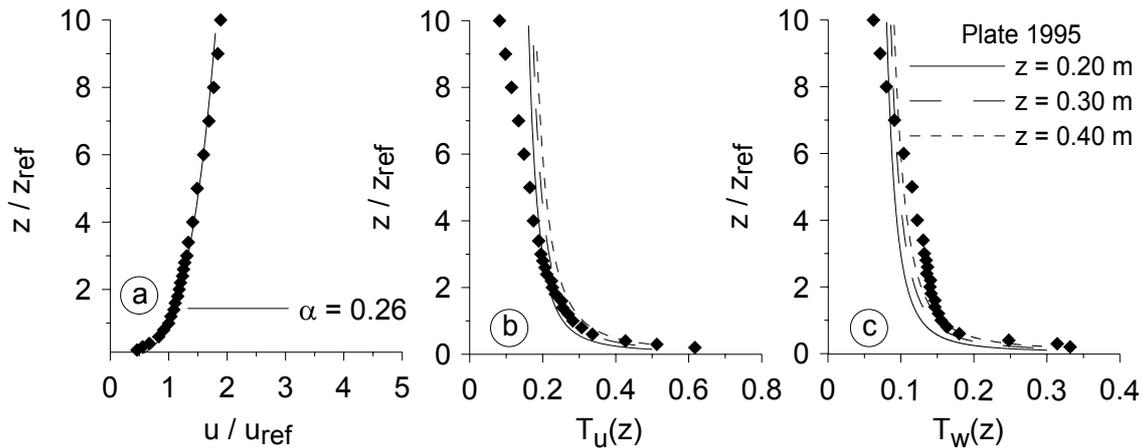


Abb. 1: Simulierte atmosphärische Grenzschicht ($z_{ref} = 0.05$ m, $u_{ref} = 4.34$ m/s)
 a) Horizontale Geschwindigkeit $u(z)$, b) Turbulenzintensität in Hauptströmungsrichtung $T_U(z)$
 c) Turbulenzintensität in vertikaler Richtung $T_W(z)$

Messtechnik

Die mittleren und turbulenten Strömungsgrößen werden mit Hilfe eines 2D-LDA-Systems erfasst. Als Lichtquelle kommt ein Argon-Ionen Laser mit einer Leistung von 4 Watt zum Einsatz. Das System arbeitet mit Vorwärtslichtstreuung und besitzt eine Brennweite von 1,5 m. Zwei Doppel-Braggzellen sorgen für die zur Detektion von Rückströmgeschwindigkeiten notwendigen Frequenzverschiebungen der Laserstrahlen. Die Datenauswertung erfolgt mit Hilfe von 2 TSI Signalprozessoren, Modell IFA 550. Die Streuteilchen werden mit einem Nebelgenerator und dem Nebelfluid 1,2-Propandiol (Durchmesser = 1 - 2 μ m) generiert. An jedem Messpunkt werden ca. 26 600 Datenpunkte mit einer Frequenz von 500 Hz im Coincidence Mode aufgenommen. Eine Punktmessung dauert somit 53 s.

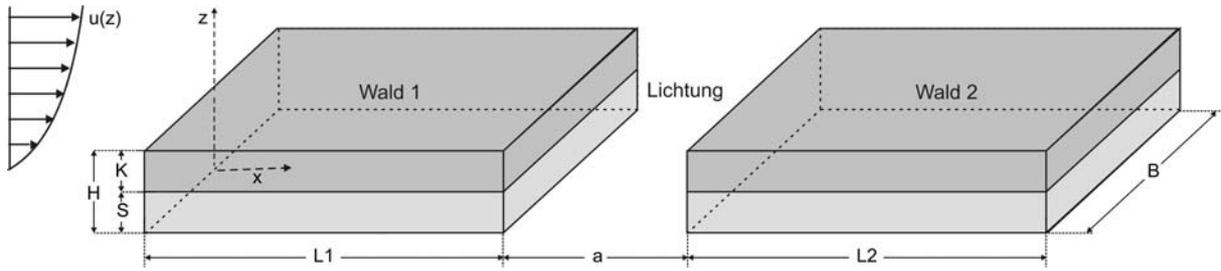
Waldmodell

Der Modellwald besteht aus 6 800 Einzelbäumen und ist in Abb. 2 skizziert. Er erstreckt sich über eine Länge $L = L_1 + L_2$ von 2.06 m = $17.9 \cdot H$ in Hauptströmungsrichtung (was bei dem zugrunde gelegten Modellmaßstab von 1:200 einer Waldlänge von 412 m in der Natur entspricht) und annähernd über die gesamte Windkanalbreite.

Die Stämme, auf welche die im Modellbau-Fachhandel erworbenen Modelltannen befestigt wurden, sind aus Polystyrol - Rundstäben gefertigt. Die Gesamthöhe des Waldes beträgt im Mittel $H = 11.5$ cm (23 m in Natur); sie setzt sich zusammen aus einer Stammhöhe $S = 5.5$ cm = $0.48 \cdot H$ (11 m) und einer mittleren Kronendachhöhe $K = 6$ cm = $0.52 \cdot H$ (12 m). Der Abstand zwischen den Bäumen ist in Hauptströmungsrichtung und in lateraler Richtung annähernd gleich: $a_x = 2.06$ cm = $0.18 \cdot H$ (4.1 m) und $a_y = 2.0$ cm = $0.17 \cdot H$ (4.0 m). Mit dieser Anordnung wird eine Bestandsdichte von 2400 Bäumen je Quadratmeter im Modell bzw. von 600 Bäumen je Hektar in der Natur erzielt. Das Waldmodell besitzt ein strukturiertes, geschlossenes Kronendach.

Der Ursprung des verwendeten x, z - Koordinatensystems liegt auf der Windkanalbodenplatte am luvseitigen Bestandsrand von Wald 1 mit der x -Koordinate in horizontaler Hauptströmungsrichtung und mit der z -Koordinate in nach oben gerichteter, vertikaler Richtung, siehe Abb. 2. Alternativ hierzu wird eine weitere x -Koordinate, x_2 , festgelegt, deren Ursprung am luvseitigen Bestandsrand von Wald 2 liegt: $x_2 = x + 8.94 \cdot H + a$.

9.4



$L1 = L2 = 8.96H, B = 11.9H$

Waldaufbau im Detail:

Seitenansicht:

Draufsicht:

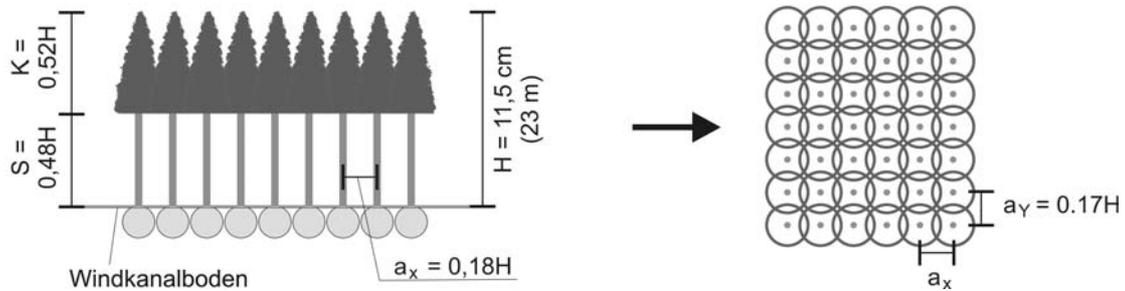


Abb. 2: Skizze des Waldmodells

	Im Luv von Wald 1	Über Wald 1	Lichtung	Über Wald 2
$a/H = 1$				
x/H	-0.26	1.26, 2.26, 4.26, 6.26, 8.17	9.04, 9.46, 9.74	10.96, 11.96, 13.96, 15.83, 17.96
$a/H = 5$				
x/H	-0.26	1.26, 2.26, 4.26, 6.26, 8.17	9.04, 9.46, 10.46, 11.46, 12.46, 13.46, 13.74	14.96, 15.96, 17.96, 19.83, 21.96

Tab. 1: Lage der vertikalen Messprofile

Die Breite der untersuchten Lichtungen wurde bisher zweifach variiert: $a / H = 1$ und $a / H = 5$. Die Anströmung erfolgt senkrecht zur Lichtungsachse.

Mehrere vertikale Profile wurden vermessen, deren genaue Positionen in Tab. 1 zusammengestellt sind. Die Profile im Luv von Wald 1 und innerhalb der Lichtung bestehen aus jeweils 24 Messpunkten ($0.08 < z/H < 4.35$) und die Profile über den beiden Wäldern aus je 17 Messpunkten ($1.04 < z/H < 4.35$). Die Messwerte dieser Profile sind Grundlage der im nächsten Kapitel gezeigten Isolinienplots. Zusätzlich wurden in einer Höhe $z/H = 1.13$ Messungen mit einer sehr feinen horizontalen Auflösung von 1 cm ($0.087 \cdot H$) durchgeführt, um die Auswirkung einer variierten Lichtungsbreite auf die Strömung in Kronendachnähe zu erfassen.

3. Ergebnisse

Mittlere Geschwindigkeiten

In Abb. 3 sind Isolinien der mittleren horizontalen Geschwindigkeit u und in Abb. 5 Isolinien der mittleren vertikalen Geschwindigkeit w dargestellt. Den Verlauf der mittleren Geschwindigkeit unmittelbar über dem Kronendach zeigt Abb. 4 für die Horizontalkomponente und Abb. 6 für die Vertikalkomponente.

In der schmalen Lichtung ($a/H = 1$) erstreckt sich ein Rezirkulationsgebiet über die gesamte Breite der Lichtung, siehe Abb. 3. In der breiten Lichtung ($a/H = 5$) löst die Strömung nicht unmittelbar an der luvseitigen Waldkante ab, sondern der Ablösepunkt verschiebt sich leicht nach Unterstrom; die Länge des Rezirkulationsgebietes x_{Rez} beträgt etwa $3 \cdot H$. Rückströmungen (negative u – Werte) treten innerhalb der Lichtungen bis in eine Höhe $z \leq 0.6 \cdot H$ auf, also bis leicht über den Stammbereich hinaus.

Die Werte der mittleren vertikalen Geschwindigkeit (Abb. 5) sind erwartungsgemäß unterhalb der Bestandsoberkante im luvseitigen Bereich der Lichtung infolge der Ausbildung der Rezirkulationsgebiete positiv (Strömung nach oben gerichtet) und weiter stromab negativ (Strömung zum Boden hin gerichtet). Oberhalb der Bestandsoberkante ($z/H > 1$) erstreckt sich über die gesamte Lichtungsbreite ein Bereich mit negativen w -Werten, dessen vertikale Ausdehnung mit der Lichtungsbreite deutlich ansteigt.

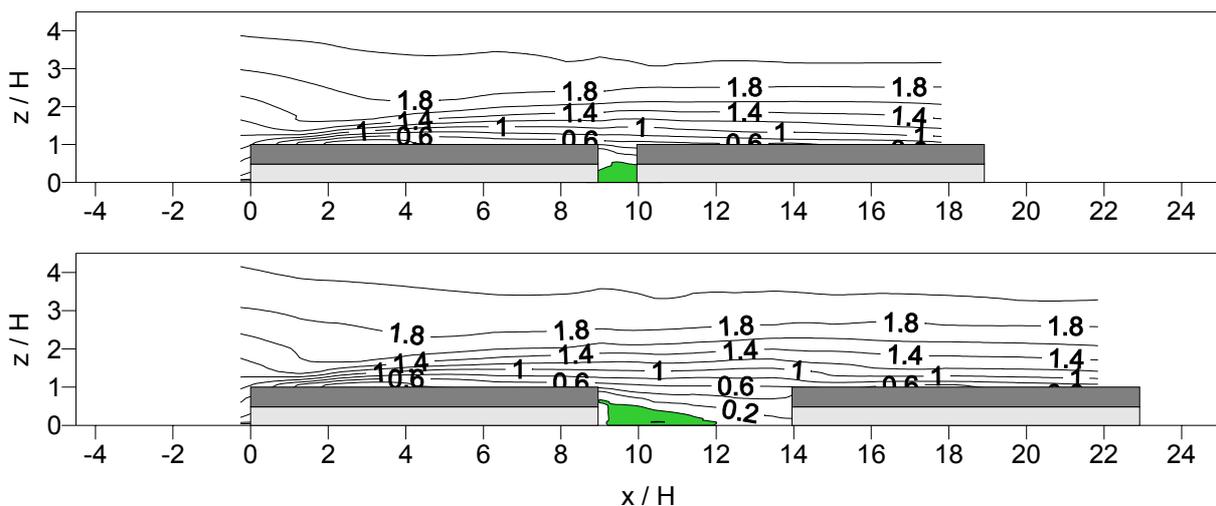


Abb. 3: Isolinien der normierten mittleren horizontalen Geschwindigkeit u / u_{ref} ($u_{\text{ref}} = 4.34 \text{ m/s}$)

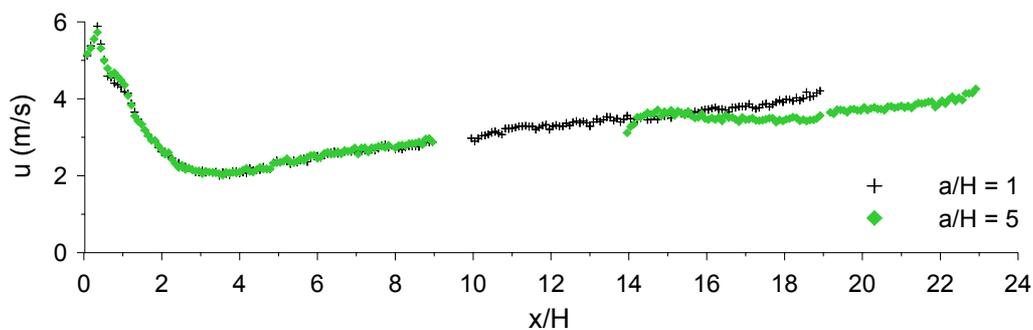


Abb. 4: Verlauf der mittleren horizontalen Geschwindigkeit u unmittelbar über dem Kronendach ($z/H = 1.13$) in Abhängigkeit von der Lichtungsbreite a/H

9.6

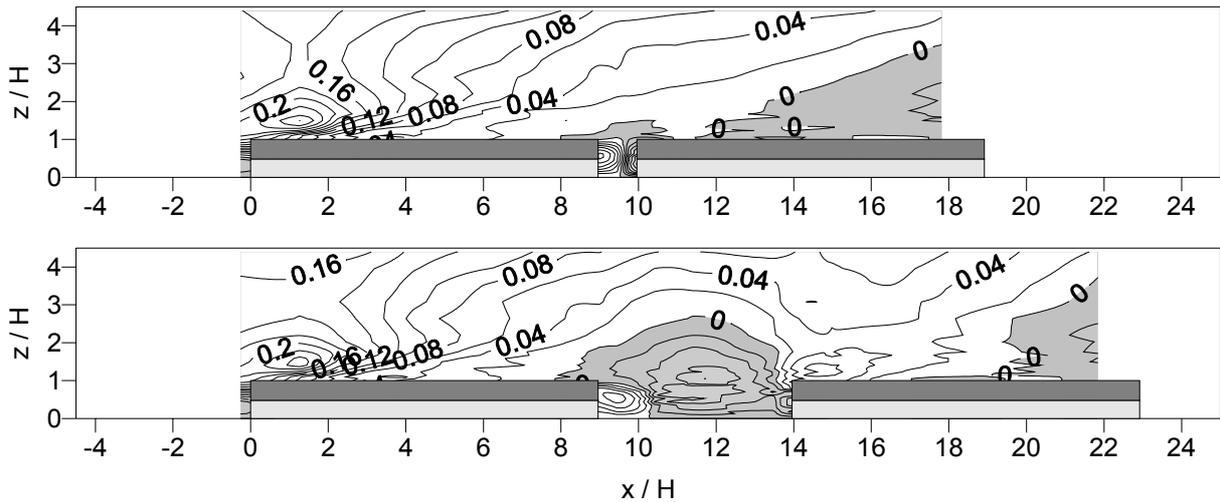


Abb. 5: Isolinien der normierten mittleren vertikalen Geschwindigkeit w / u_{ref} ($u_{\text{ref}} = 4.34 \text{ m/s}$)

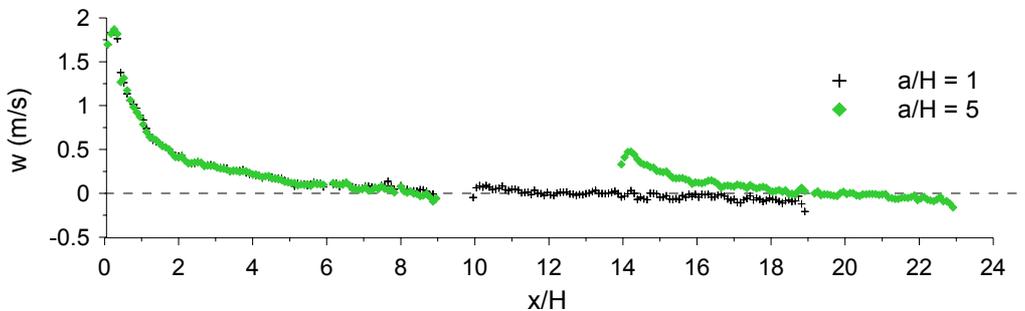


Abb. 6: Verlauf der mittleren vertikalen Geschwindigkeit w unmittelbar über dem Kronendach ($z/H = 1.13$) in Abhängigkeit von der Lichtungsbreite a/H

Abb. 4 zeigt, dass über Wald 1 die mittlere horizontale Geschwindigkeit u in Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) vom luvseitigen Bestandsrand bis zur zweiten Baumreihe zunimmt, danach bis $x \approx 3H$ relativ steil abfällt und im Folgenden bis zur Wind abgewandten Bestandskante wieder langsam ansteigt. Dieser Verlauf zeigt sich von der Lichtungsbreite unbeeinflusst. Der allmähliche Anstieg setzt sich stromab der schmalen Lichtung ($a/H = 1$) über Wald 2 kontinuierlich fort. Bei der breiteren Lichtung ist im Vergleich hierzu bis $x_2 = 3 \cdot H$ ein Anstieg der horizontalen Geschwindigkeiten zu beobachten.

Die mittlere vertikale Geschwindigkeit (Abb. 6) nimmt über Wald 1 - nach einem leichten Anstieg unmittelbar an der Luvkante - ab der zweiten Baumreihe erst schnell und dann langsam aber kontinuierlich ab. In der Nähe des leeseitigen Bestandsrands von Wald 1 (ab $x \approx 8 \cdot H$) treten leicht negative Werte auf. Entlang der Bestandsoberkante von Wald 2 ist im Fall der schmalen Lichtung ebenfalls eine sehr allmähliche Abnahme der w -Werte zu beobachten. Bis zu $x_2 \approx 1.5 \cdot H$ sind die Werte dabei positiv, weiter stromab negativ. Insgesamt sind über Wald 2 alle Werte nahe Null. Stromab der breiten Lichtung sind die vertikalen Geschwindigkeiten bis etwa $x_2 \approx 4 \cdot H$ höher als stromab der schmalen Lichtung, wobei der größte Anstieg im Bereich der luvseitigen Traufkante auftritt. Weiter stromab (ab $x_2 \approx 4 \cdot H$) wirkt sich die erhöhte Lichtungsbreite nicht nennenswert aus.

Standardabweichungen

Isolinien der Standardabweichungen der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeiten sind in Abb. 7 und Abb. 9 dargestellt. Den Verlauf der Standardabweichung unmittelbar über dem

Kronendach zeigt Abb. 8 für die Horizontalkomponente und Abb. 10 für die Vertikalkomponente.

Die Maximalwerte der Standardabweichung u' treten bei der Anordnung $a/H = 1$ über der leeseitigen Hälfte des 1. Waldes auf, bei $a/H = 5$ hingegen über der Lichtung, siehe Abb. 7. Im bodennahen Bereich innerhalb der schmalen Lichtung sind die Schwankungswerte durchweg niedrig; bei der breiten Lichtung zeichnen sich insbesondere die waldnahen Bereiche durch kleine Werte aus.

Die Maximalwerte von w' stellen sich bei der Anordnung $a/H = 1$ oberhalb der luvseitigen Bestandskante von Wald 1 ein, siehe Abb. 9. Ihre Lage ist somit im Vergleich zu der Position der maximalen u' – Werte nach Unterstrom verschoben. Bei der Anordnung $a/H = 5$ treten die Höchstwerte der Standardabweichung w' wiederum im Lichtungsbereich auf. Das Verhalten im bodennahen Bereich der Lichtung ist bei den w' – Werten ähnlich wie bei den u' – Werten: Die w' – Werte sind bei der schmalen Lichtung über deren gesamte Breite und bei der breiten Lichtung wiederum insbesondere im luvseitigen Randbereich niedrig.

Ein Vergleich von Abb. 9 mit Abb. 7 zeigt, dass die w' – Werte generell kleiner als die u' – Werte sind.

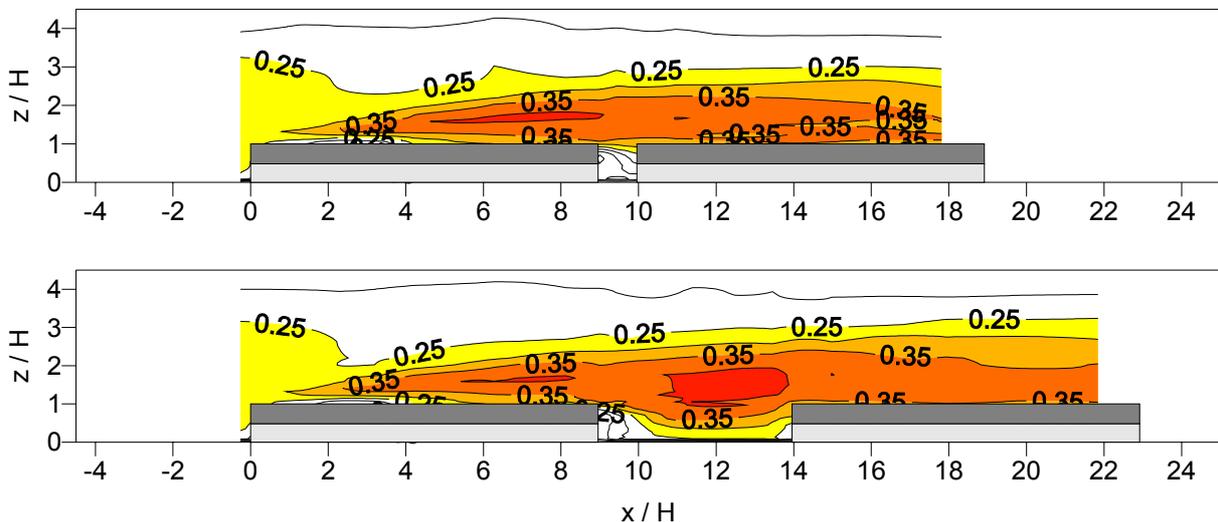


Abb. 7: Isolinien der normierten Standardabweichung der horizontalen Geschwindigkeit u' / u_{ref} ($u_{\text{ref}} = 4.34 \text{ m/s}$)

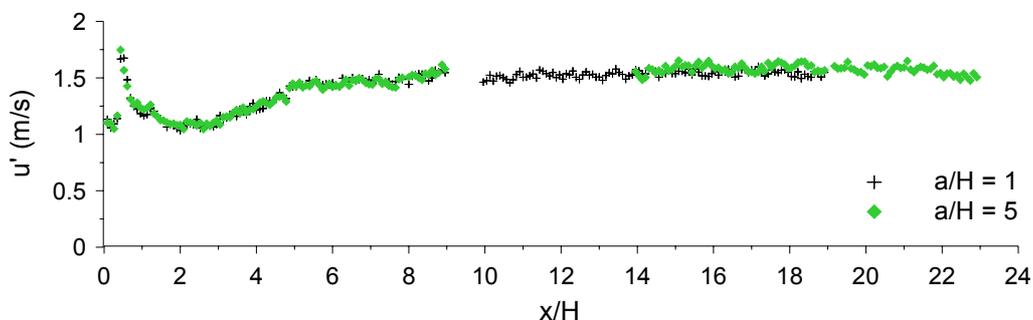


Abb. 8: Verlauf der Standardabweichung der horizontalen Geschwindigkeit u' unmittelbar über dem Kronendach ($z/H = 1.13$) in Abhängigkeit von der Lichtungsbreite a/H

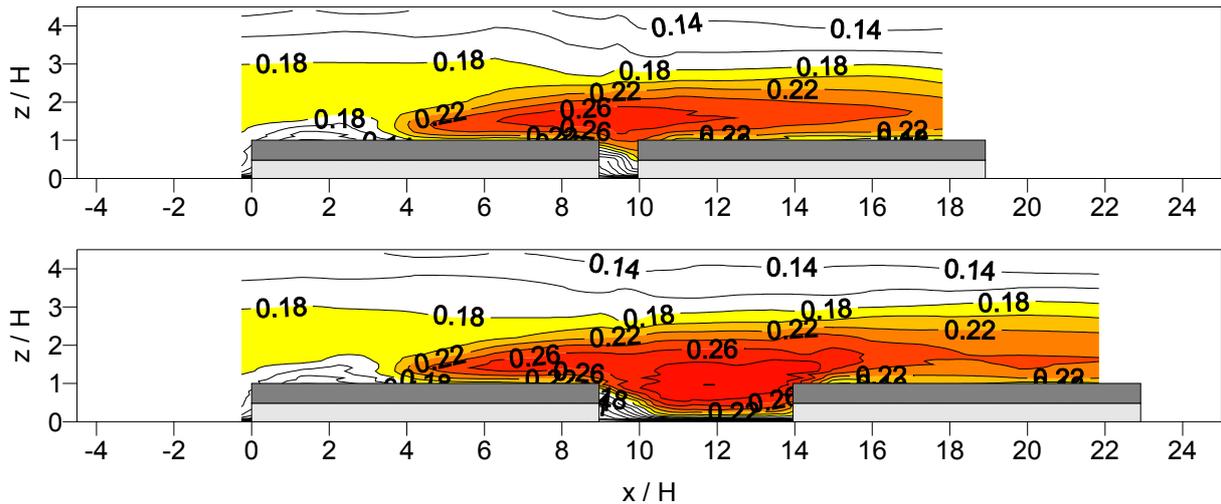


Abb. 9: Isolinen der normierten Standardabweichung der vertikalen Geschwindigkeit w' / u_{ref} ($u_{\text{ref}} = 4.34 \text{ m/s}$)

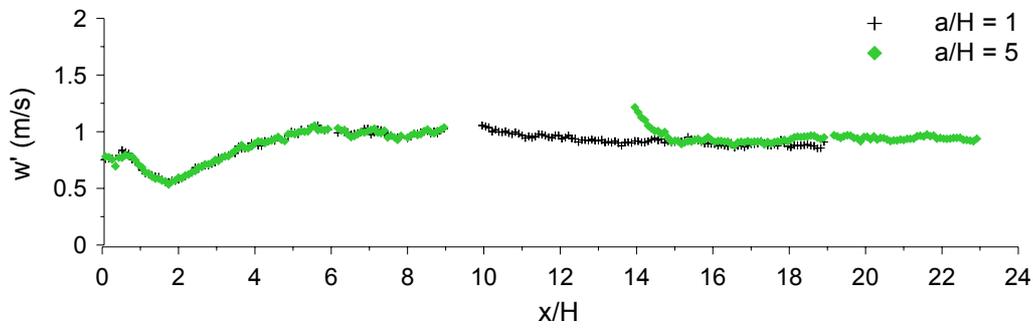


Abb. 10: Verlauf der Standardabweichung der vertikalen Geschwindigkeit w' unmittelbar über dem Kronendach ($z/H = 1.13$) in Abhängigkeit von der Lichtungsbreite a/H

Der Verlauf der Standardabweichung der horizontalen Geschwindigkeit weist, wie in Abb. 8 zu sehen ist, in der Nähe der luvseitigen Traufkante von Wald 1 wiederum einen Peak über der 2. Baumreihe auf. Die kleinsten u' - Werte treten unmittelbar über der luvseitigen Bestandskante und bei $x \approx 2 \cdot H$ auf. Weiter stromab ($x > 2 \cdot H$) steigen die Werte der Standardabweichungen u' bis $x \approx 5 \cdot H$ merklich an und verändern sich von da an bis zum leeseitigen Bestandsrand nur noch wenig (mit einer leicht ansteigenden Tendenz). Der Verlauf über dem zweiten Wald ist sehr einheitlich und von der Lichtungsbreite nahezu unbeeinflusst.

Abb. 10 zeigt den Verlauf der Standardabweichung der vertikalen Geschwindigkeit w' . Ein nur schwach ausgeprägter Peak zeigt sich über der 3. Baumreihe des luvseitigen Walds. Der Minimalwert stellt sich bei $x \approx 1.7 \cdot H$ ein. Ab $x \approx 5 \cdot H$ wird wiederum ein annähernd konstanter Wert erreicht, der sich auch im Lee der schmalen Lichtung einstellt (mit leicht abnehmender Tendenz). Im Luv der breiten Lichtung sind in unmittelbarer Traufkantennähe die Standardabweichungen der vertikalen Geschwindigkeitskomponente im Vergleich zur schmalen Lichtung erhöht.

4. Dankesworte

Die Untersuchungen werden im Rahmen des Projekts „Verbesserung der Sturmstabilität von Waldbeständen“ durchgeführt, welches Teil des RESTER - Verbundprojekts „Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder“ innerhalb des Forschungsprogramms „Herausforderung Klimawandel“ ist. Die Autoren möchten sich an dieser Stelle beim Um-

weltministerium Baden-Württemberg für die gewährte Förderung aus der Zukunftsoffensive IV bedanken.

Literatur

- BERGEN, J.D.: 1975, Air Movement in a Forest Clearing as Indicated by Smoke Drift, *Agricultural Meteorology* 15, 165-179.
- BERGEN, J.D.: 1976, Windspeed Distribution in and near an Isolated, Narrow Forest Clearing, *Agricultural Meteorology* 17, 111-133.
- FOUDHIL, H., BRUNET, Y., CALTAGIRONE, J.-P.: 2005, A Fine-Scale $k-\epsilon$ Model for Atmospheric Flow over Heterogeneous Landscapes, *Environmental Fluid Mechanics* 5, 247-265.
- PLATE, E.J.: 1995, Windprofile in der Gebäudeaerodynamik. In: Plate, E.J. (ed.) *Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten*, WTG-Berichte Nr. 3, 7-26, Windtechnologische Gesellschaft, Aachen.
- RAUPACH, M.R., BRADLEY, E.F., GHADIRI, H.: 1987, A Wind Tunnel Investigation into the Aerodynamic Effect of Forest Clearings on the Nesting of Abbott's Booby on Christmas Is-land, Internal Report, CSIRO Division of Environmental Mechanics, Canberra, Australia, 21 p.
- SOGACHEV, A., PANFEROV, O.: 2006, Modification of Two-Equation Models to Account for Plant Drag, *Boundary-Layer Meteorology* 121, 229-266.
- STACEY, G.R., BELCHER, R.E., WOOD, C.J., GARDINER, B.A.: 1994, Wind Flows and Forces in a Model Spruce Forest, *Boundary-Layer Meteorology* 69, 311-334.
- WILSON, J.D., FLESCHE, T.K.: 1999, Wind and Remnant Tree Sway in Forest Cutblocks. III. A Wind-flow Model to Diagnose Spatial Variation, *Agricultural and Forest Meteorology* 93, 259-282.